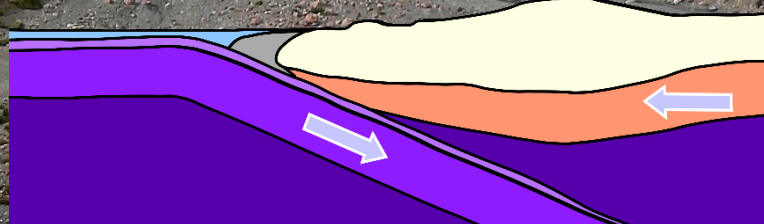


DE LA TECTÓNICA DE PLACAS A LA CORDILLERA DEL ATLAS

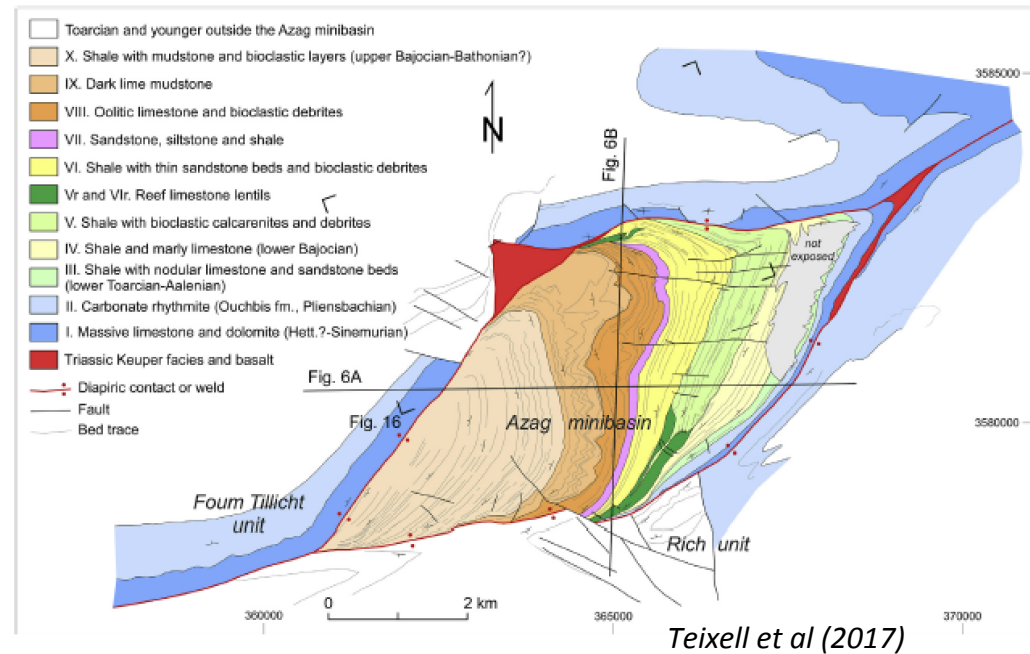
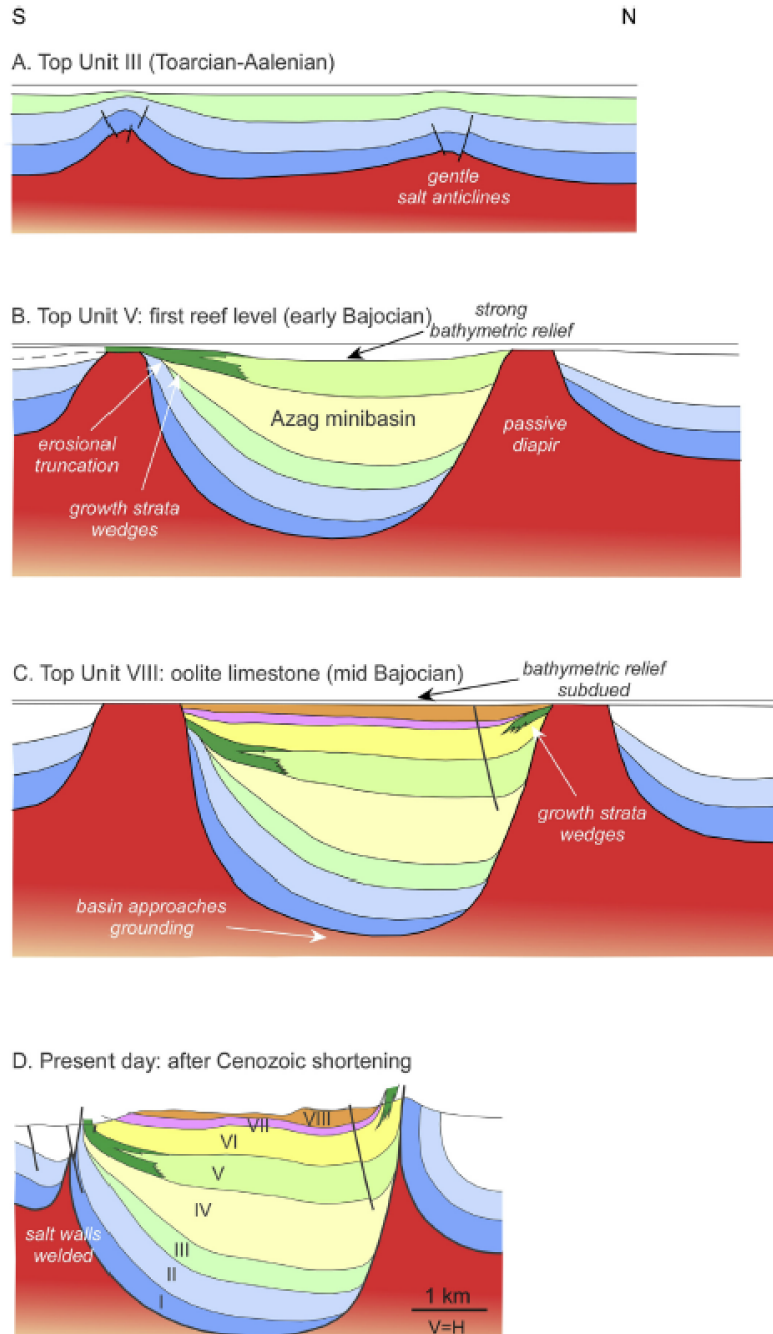
Qué estudia un geólogo para interpretar las cadenas de montañas

Maria Luisa Arboleya
Dpt. de GEOLOGIA



Universitat
Autònoma
Barcelona

Evolución de una estructura diapírica

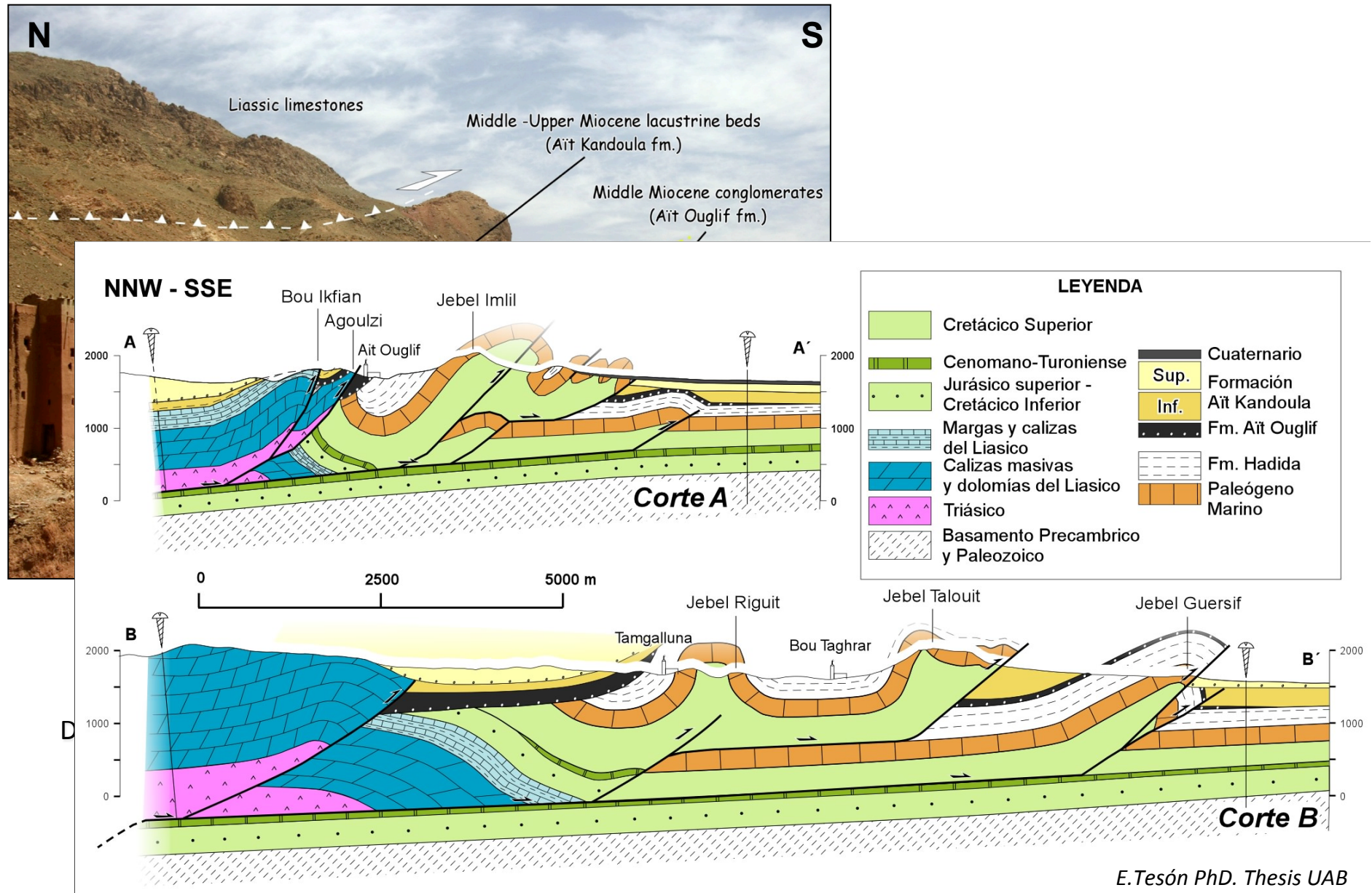


Edad del diapirismo:

Lías en la parte oeste y Lías sup.-
Dogger en la parte central del Alto
Atlas (Saura et al., 2014).

Detalle de las estructuras de acortamiento en respuesta a la compresión

Inversión tectónica de las estructuras extensionales y formación de fallas nuevas





- **Acortamiento:**
Alto Atlas entre 24 y 15% disminuye de E a W
Atlas Medio < 10%
- **Topografía elevada** (hasta 4000 m)
- **Espesor de la corteza** entre 38 y 40 km



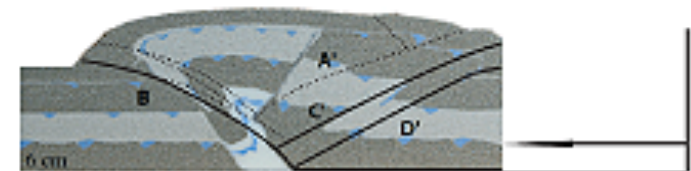
Esto indica que no todo el relieve del Atlas es debido a acortamiento y engrosamiento de la corteza, sino que debe existir un factor adicional para el levantamiento de la cadena.

Modelo analógico que muestra la inversión de un rift

Phase 1: EXTENSIÓN EN EL TRIÁSICO Y JURÁSICO

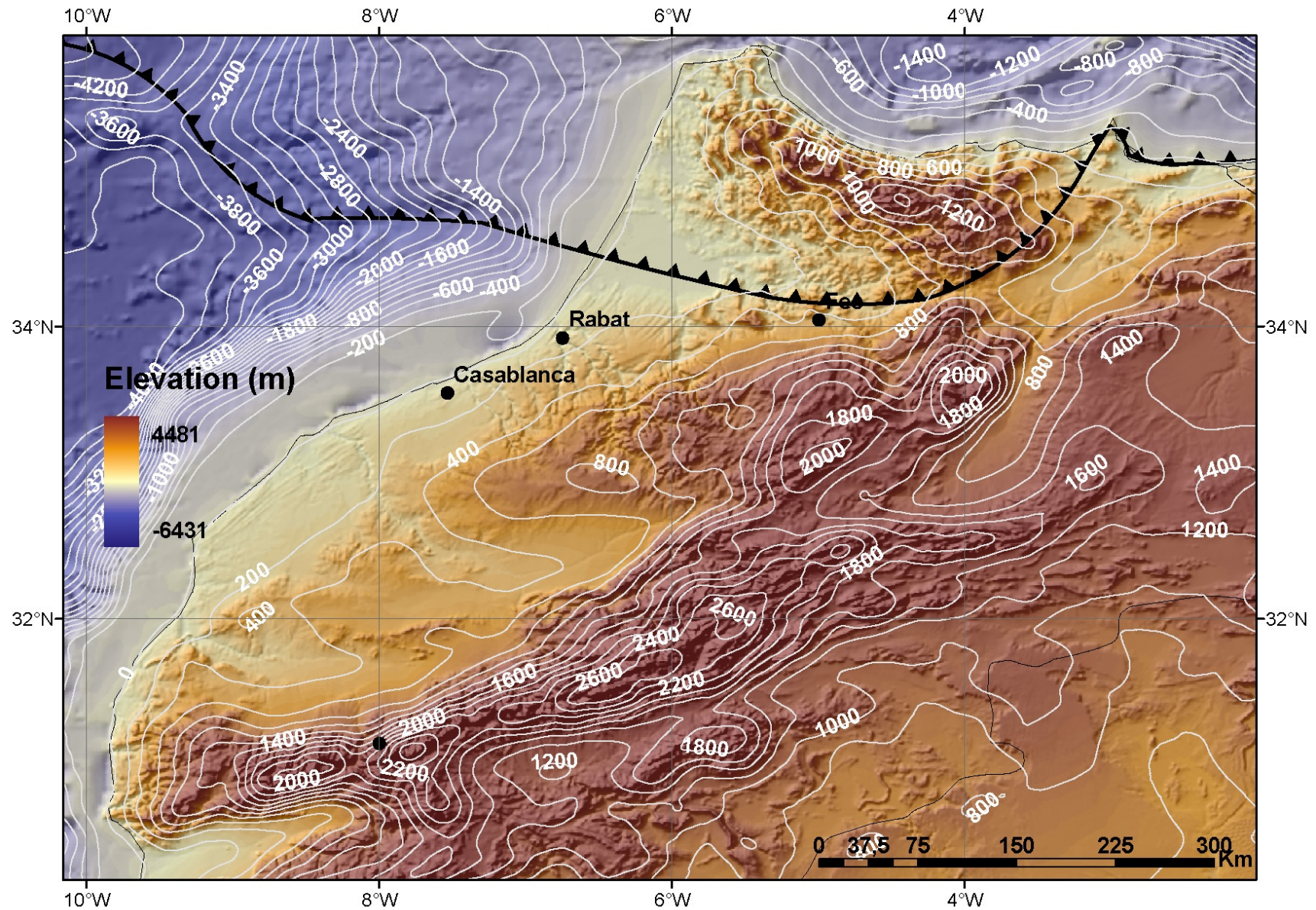


Phase 2: ACORTAMIENTO EN LOS ÚLTIMOS 40 Ma

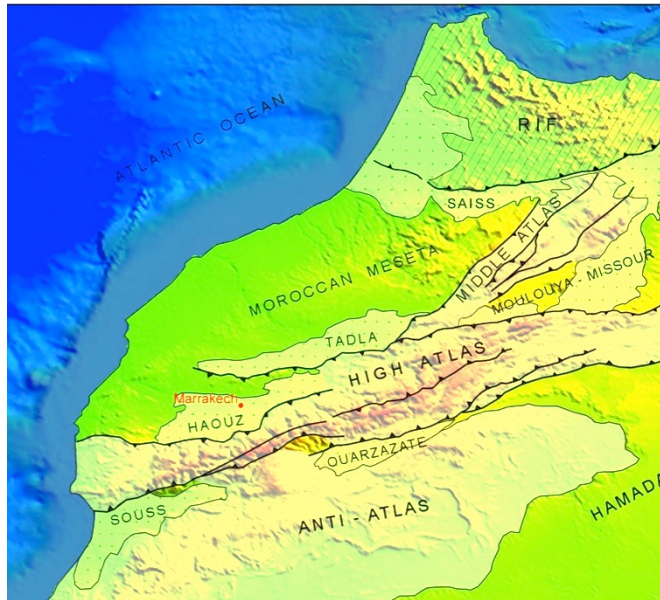


ASÍ SE FORMÓ EL ATLAS

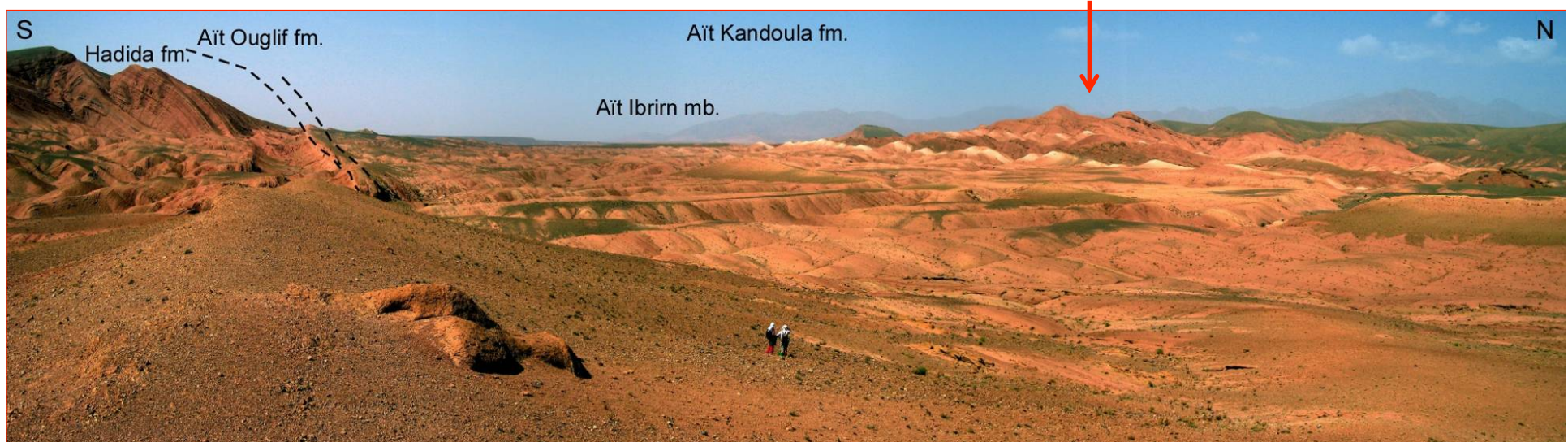
TOPOGRAFÍA



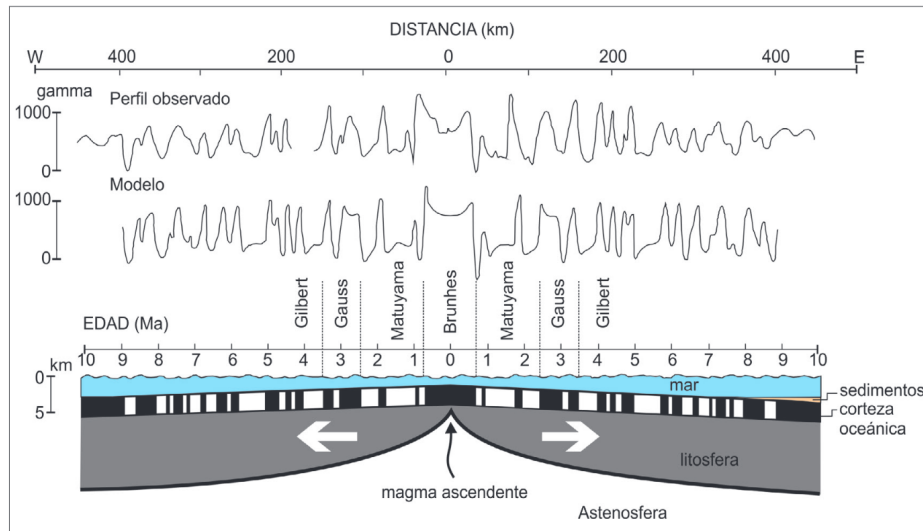
Edad de la deformación: a partir del registro de sedimentos



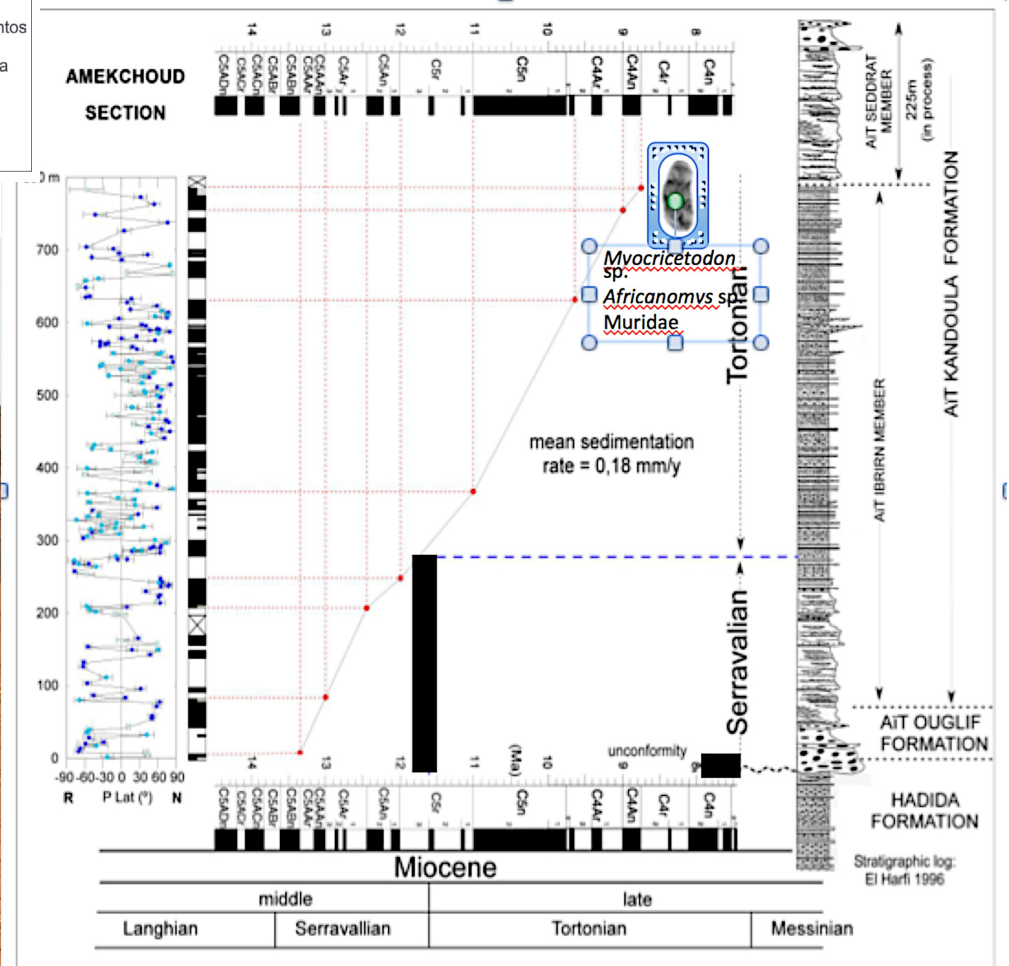
Sedimentos de la cuenca de Ouarzazate



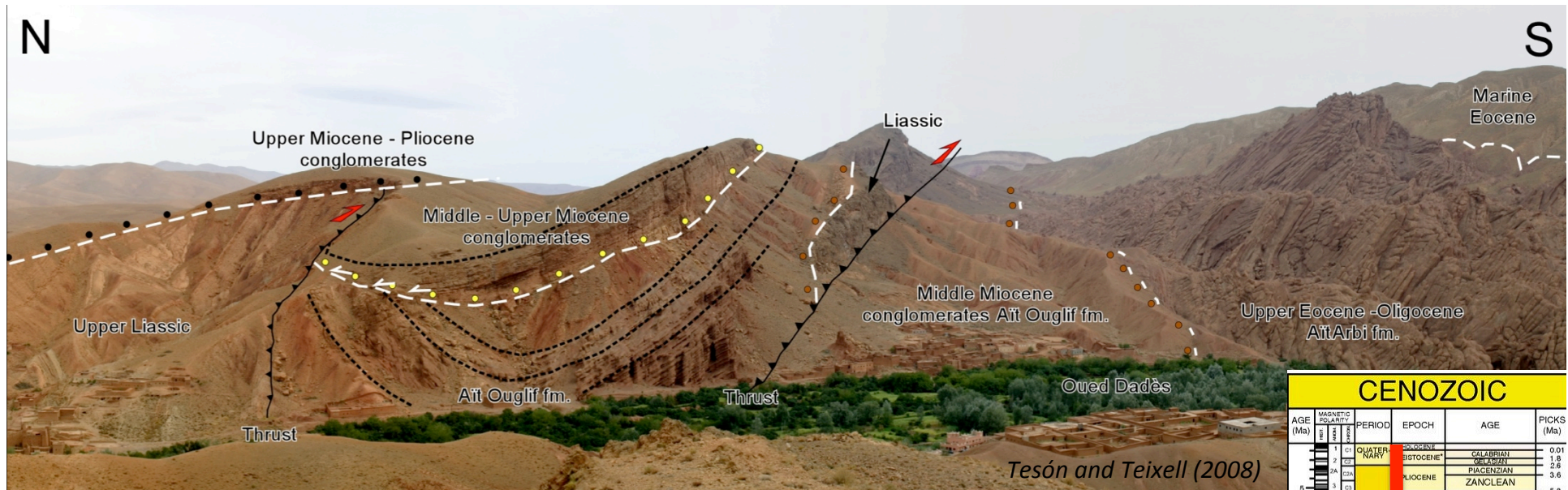
Datación por paleomagnetismo: cuando no hay fósiles



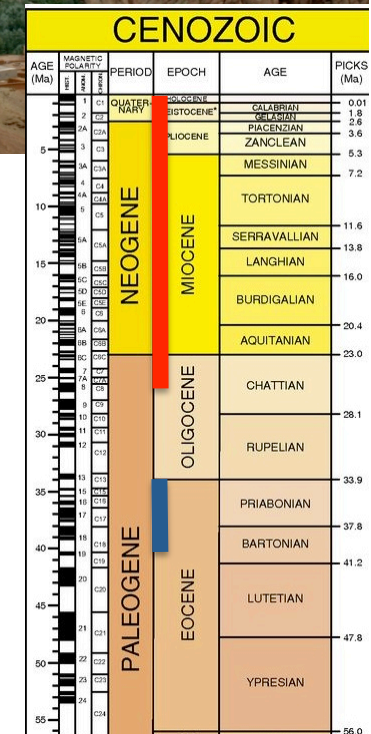
Formación de las anomalías magnéticas del fondo oceánico (modificada de Butler, 1992).



Edad del plegamiento del Atlas



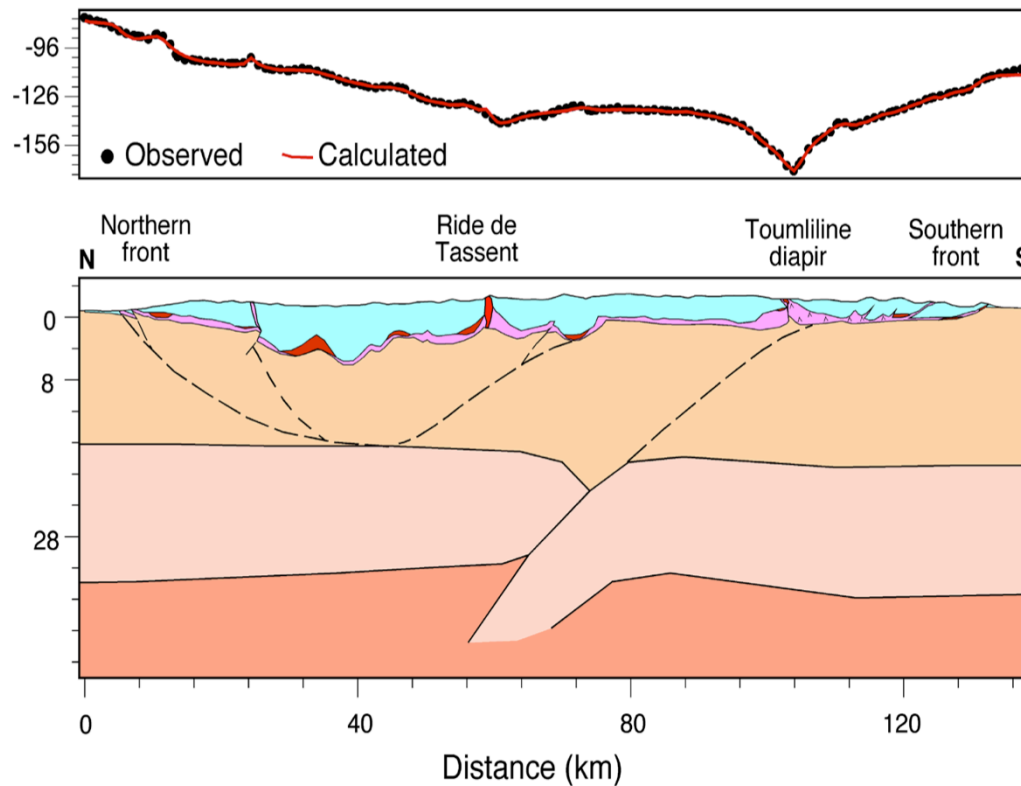
- Los primeros depósitos en la cuenca de antepaís son del Eoceno Medio sup.(40 ma)
- Las principales estructuras de acortamiento se produjeron desde el oligoceno superior hasta la actualidad



MODELADO DE LA ESTRUCTURA CORTICAL (I)

Basada en datos microgravimétricos

Perfil de Imilchil



- Engrosamiento cortical moderado
- Espesor de la corteza no supera los 40 km
- Cabalgamiento de escala cortical, situado al N del Alto Atlas que desplaza la discontinuidad de Mohorovicic y penetra en el manto superior

Density scale

Jurassic and Cretaceous sedimentary rocks 2.6 gr/cm³	Triassic dolerite 2.9 gr/cm³	Upper crustal basement 2.75 gr/cm³
Triassic sedimentary rocks 2.3 gr/cm³	Jurassic gabbro 2.9 gr/cm³	Lower crust 2.93 gr/cm³
Triassic salt and shale 2.0 gr/cm³		Upper mantle 3.3 gr/cm³

Ayarza et al (2005)

MODELADO DE LA ESTRUCTURA CORTICAL (II): sismología activa

EL PROYECTO SIMA: Perfil de sísmica de reflexión de alta definición 700 km a través del Atlas marroquí y las montañas del Rif

Objetivos:

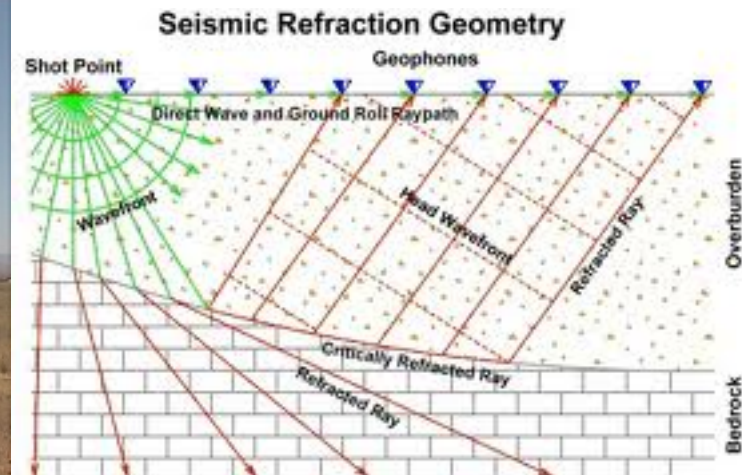
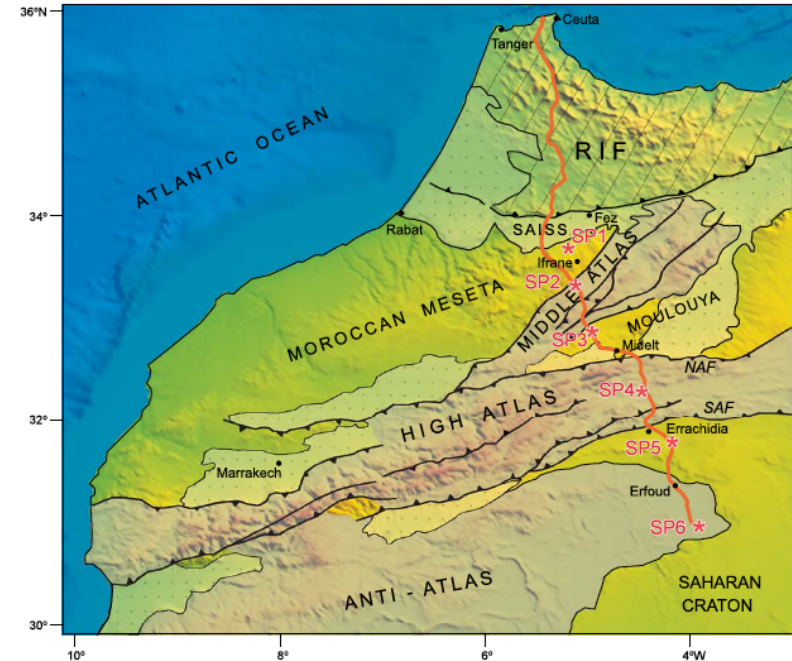
- Determinar el espesor de la corteza (posición y la geometría del Moho)
- Cuantificar los mecanismos que soportan el relieve del Atlas

Energía:

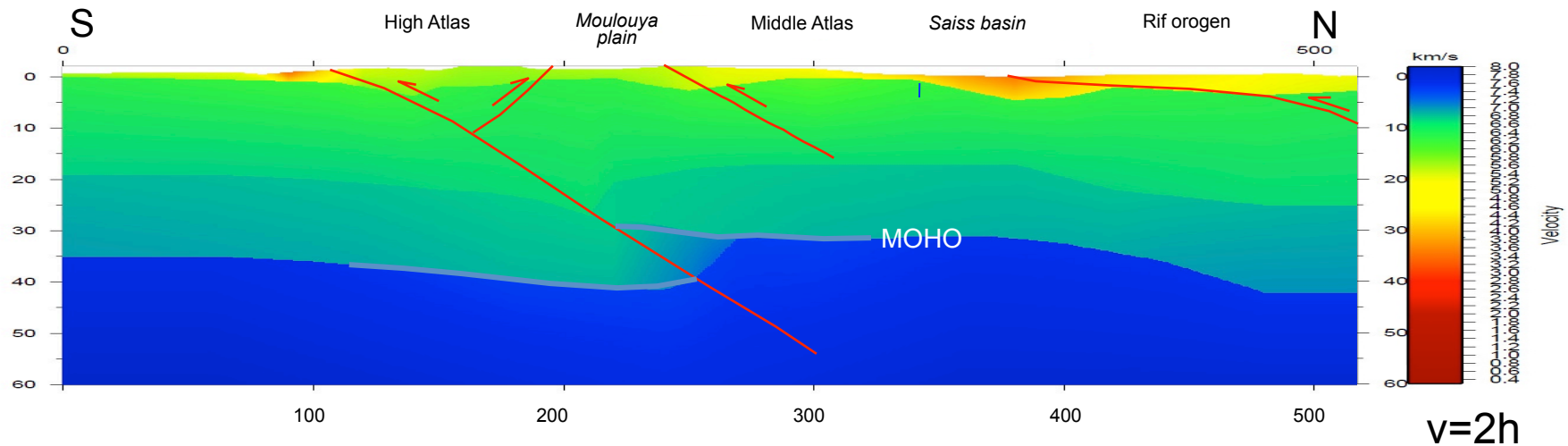
- 6 explosiones de 1Tm de explosivos disparados a prof. de 30 a 60 m.

Registro:

- 939 estaciones sísmicas separadas entre sí 400 m



Modelo tectónico de la corteza a partir de SIMA

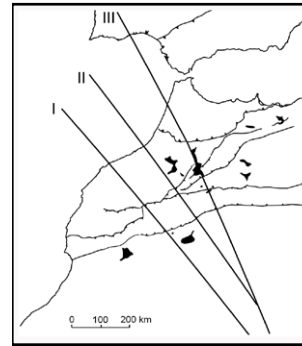
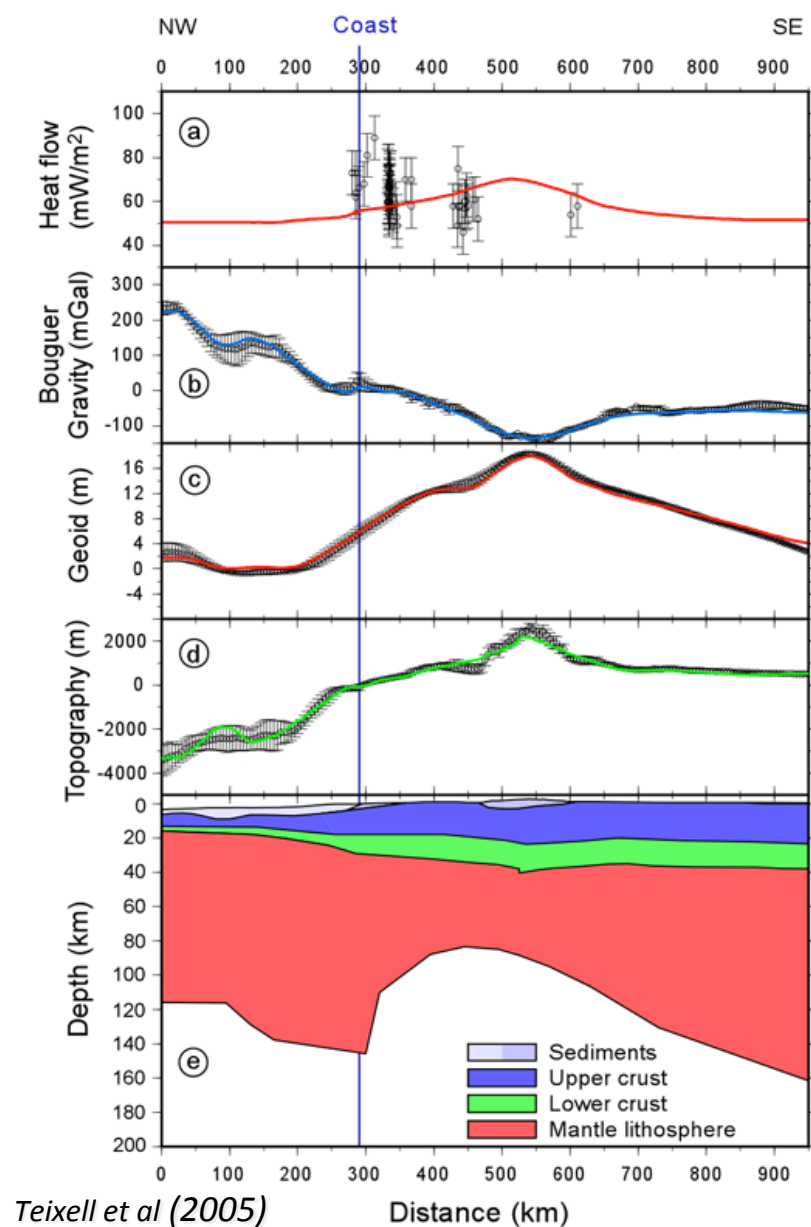


- Cabalgamiento inclinado al N –NW que atraviesa la corteza y corta la discontinuidad de Mohorovicic indicando la existencia de una raíz cortical en la parte N del Alto Atlas
- Definida la forma de la raíz cortical que soporta la elevada topografía del Atlas

MODELIZACIÓN LITOSFÉRICA:

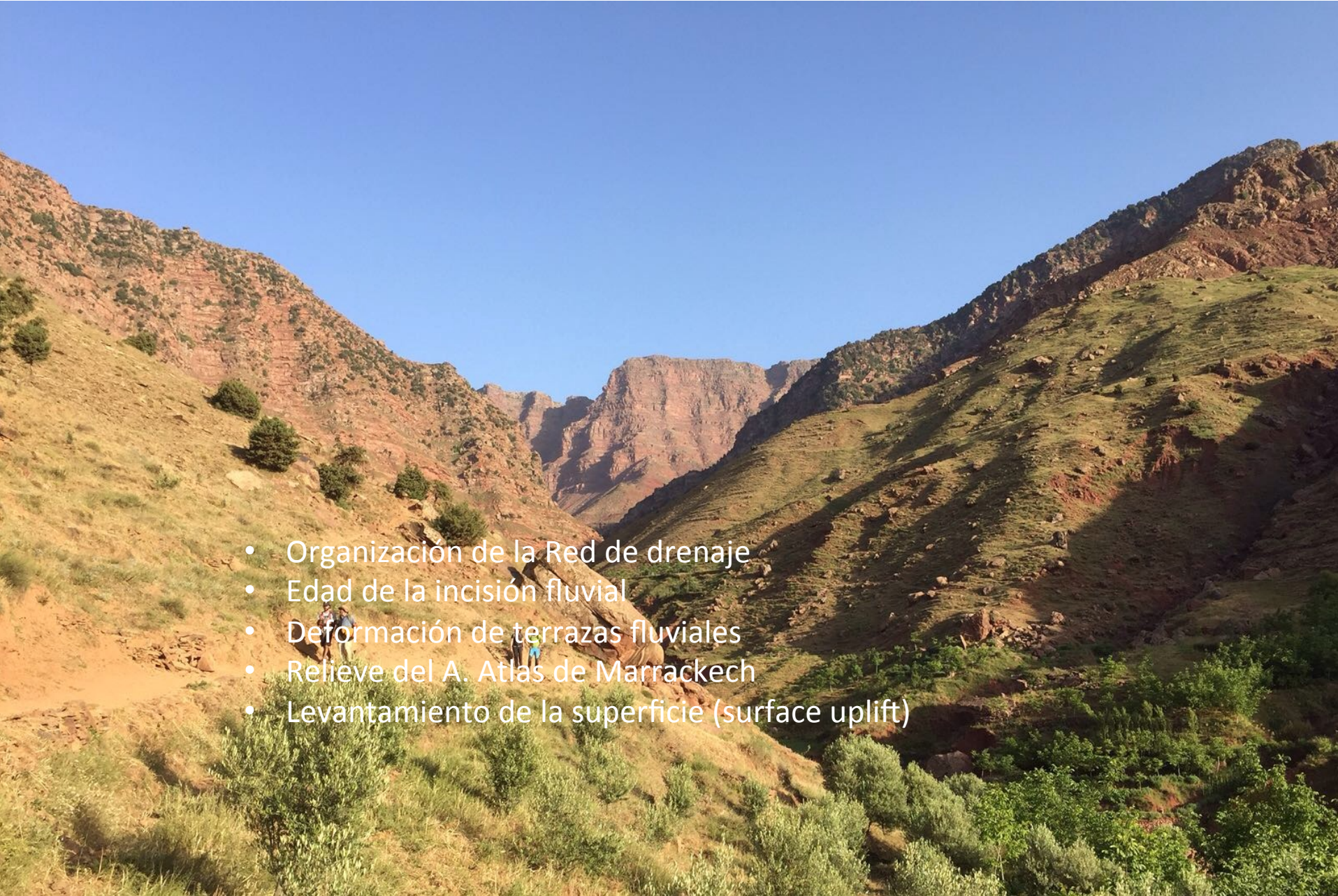
basada en campos potenciales (flujo de calor, geoide, gravedad y topografía)

IMILCHIL Profile II: 9W/36N; 3W/29N

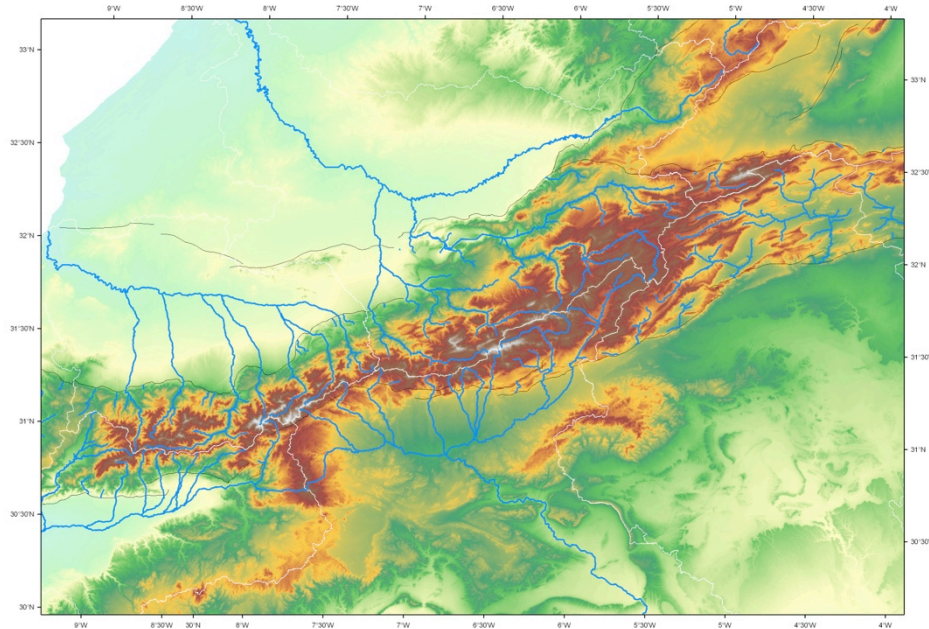


- Se deduce un adelgazamiento importante de la litosfera bajo el Alto Atlas que no está ligado a extensión sinó a ascenso del manto astenosférico
- Explica la elevada topografía, el magmatismo y las bajas velocidades de propagación de las ondas sísmicas

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DEL RELIEVE

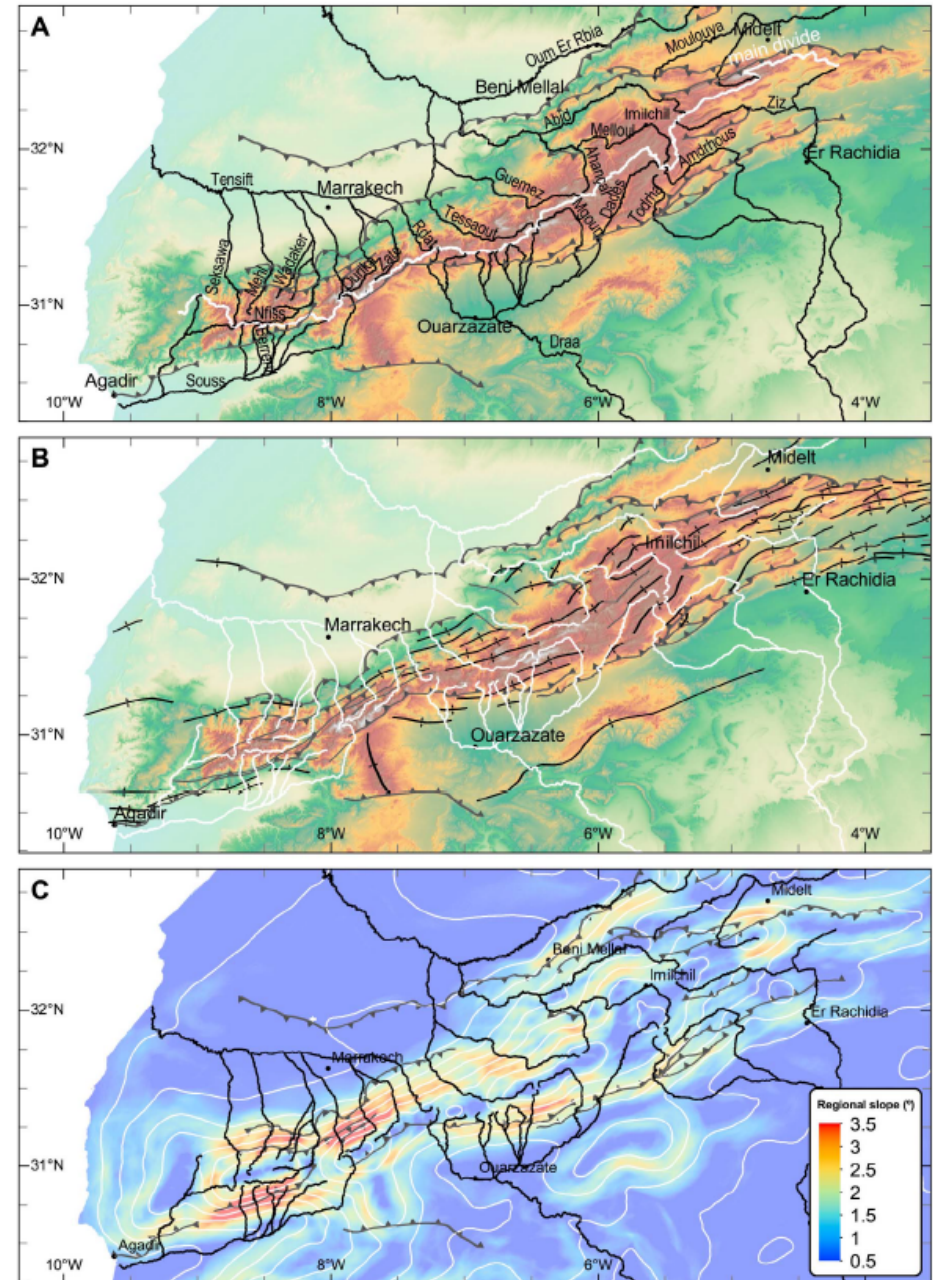
- 
- Organización de la Red de drenaje
 - Edad de la incisión fluvial
 - Deformación de terrazas fluviales
 - Relieve del A. Atlas de Marrakech
 - Levantamiento de la superficie (surface uplift)

ANÁLISIS DE LA ORGANIZACIÓN DE LA RED DE DRENAJE



En las partes E y central del Alto Atlas los cauces de agua se disponen paralelos a las estructuras, en la parte E la red fluvial evoluciona desde rios longitudinales a transversales.

La litología y el clima no son parámetros dominantes en esta evolución, sinó que es la pendiente regional el factor dominante



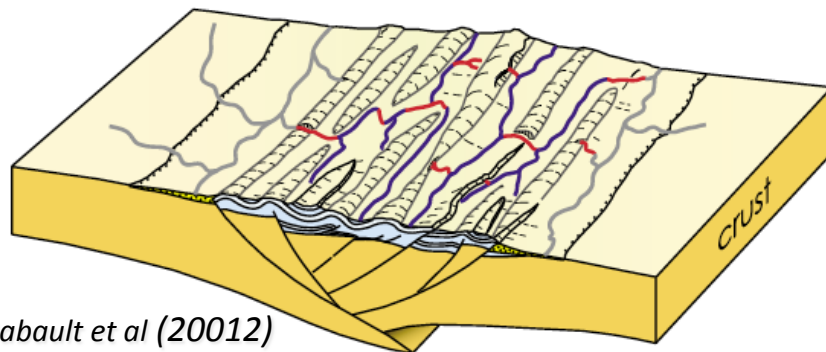


Captura activa en el Alto Atlas de Marrakech

A. Early rift inversion

low structural relief
gentle regional slope

longitudinal-dominated streams
(structure-controlled)

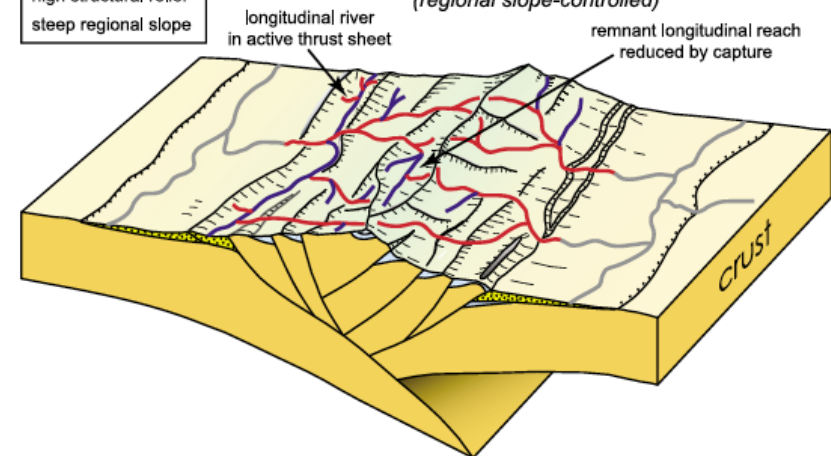


Babault et al (20012)

B. Mature inversion

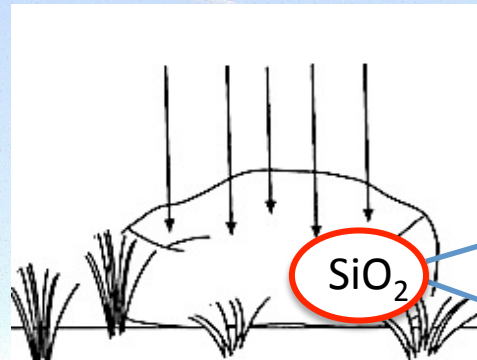
high structural relief
steep regional slope

transverse-dominated streams
(regional slope-controlled)

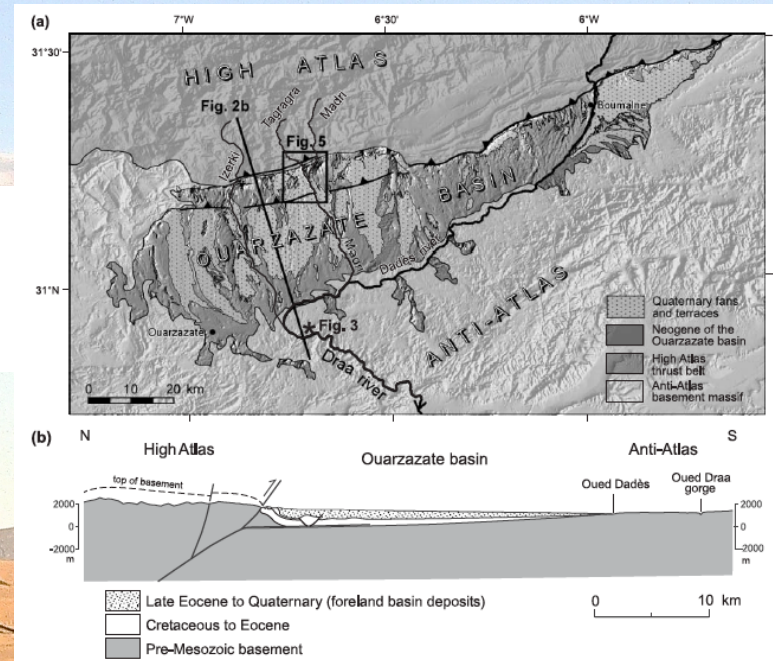


La red transversal (controlada por la pendiente) es posterior a la red longitudinal (controlada por la estructura)

EDAD DE LA INCISIÓN FLUVIAL: Datación de la edad de exposición de las terrazas fluviales de la cuenca de Ouarzazate mediante núclidos cosmogénicos



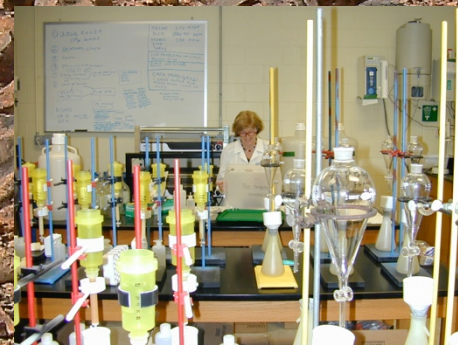
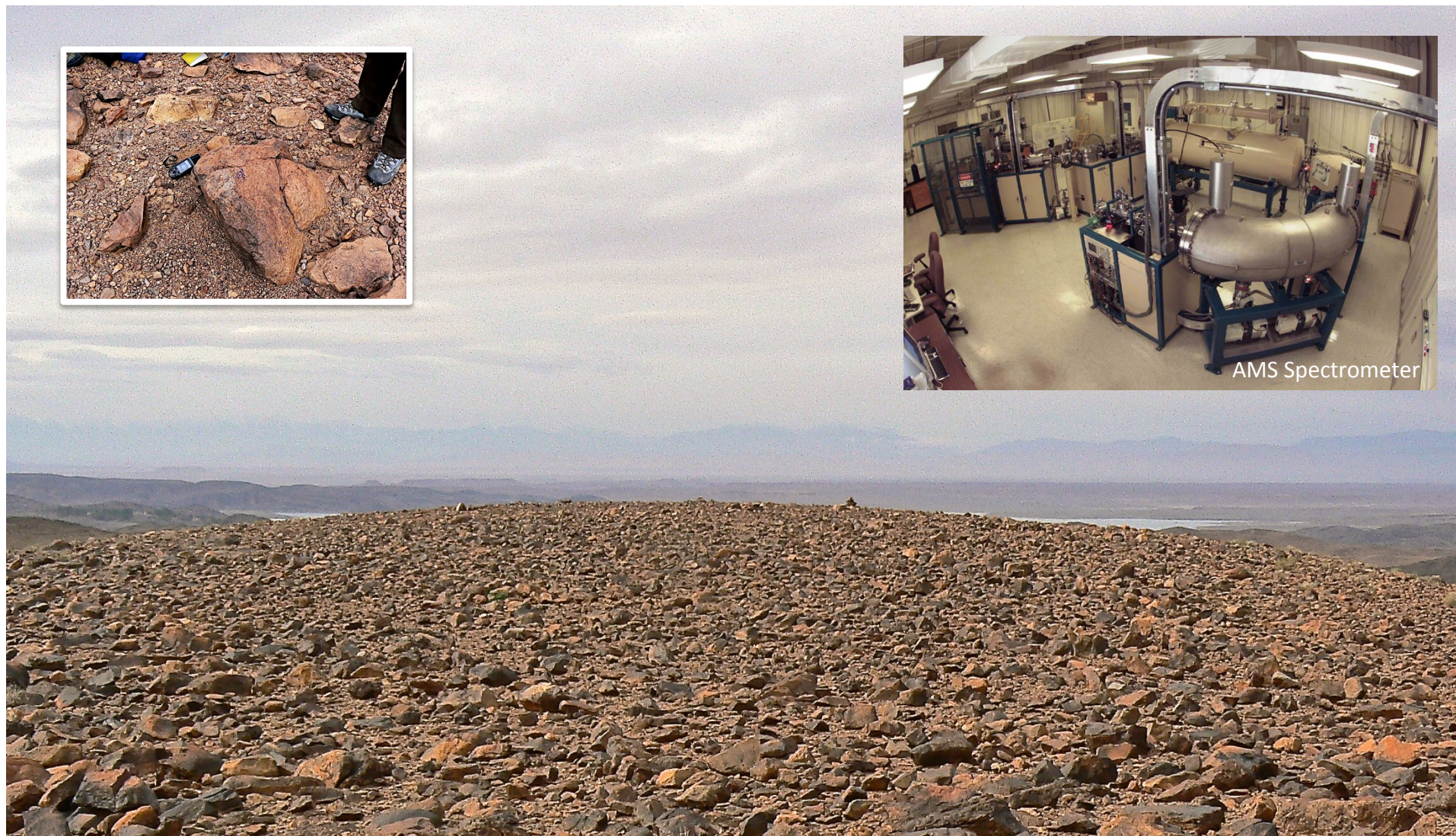
^{10}Be tiempo resid.
atmósfera 1-2
 ^{26}Al



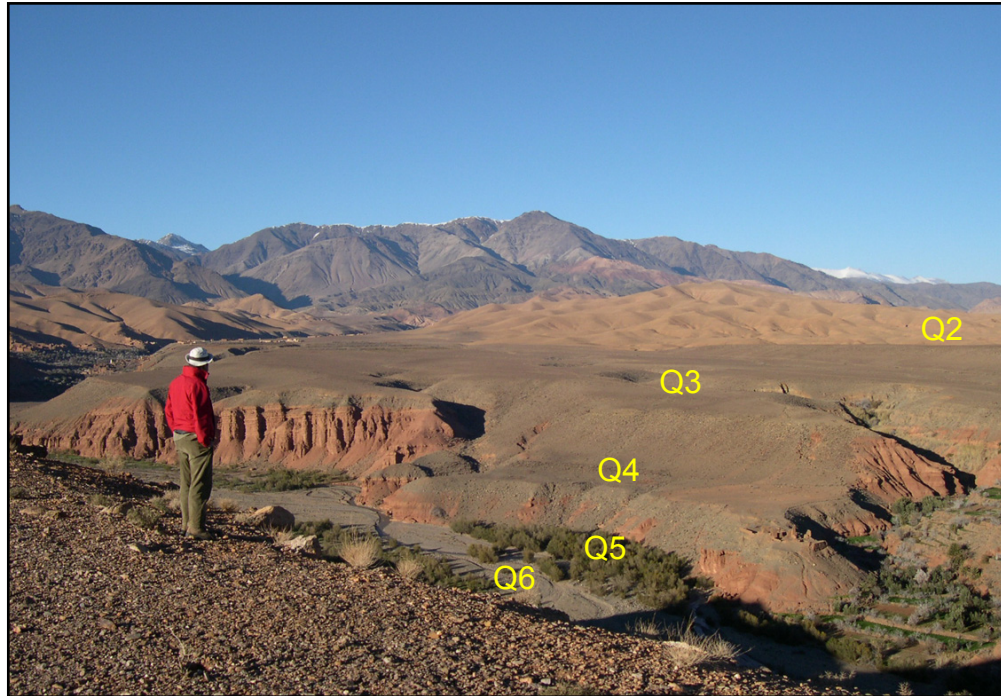
cosmogenic nuclides

Radionuclide (daughter)	Half-life (years)	Detection limit* (10^{-15})
^{10}Be (^{10}B)	1,500,000	5
^{14}C (^{14}N)	5,730	3
^{26}Al	730,000	5
^{36}Cl	301,000	1
^{41}Ca	100,000	5
^{129}I	16,000,000	20

Detection limit = value for the atom ratio radionuclide/stable nuclide, measured for a "blank" sample that contains a negligible amount of the radionuclide



Geocronología de las Terrazas fluviales del Oued Madri



Q1: 250-270 ky (MIS-9c)

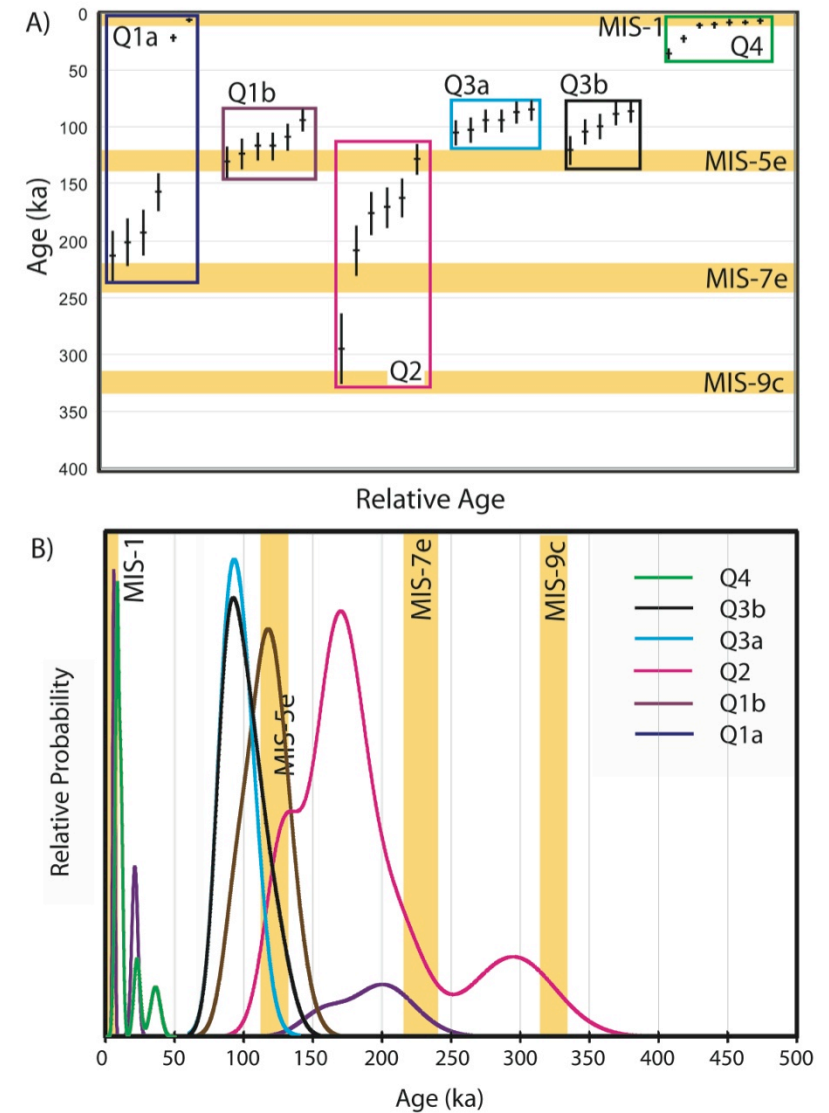
Q2: 163-174 ky (MIS-7e)

Q3: 85-100 ky (MIS-5e)

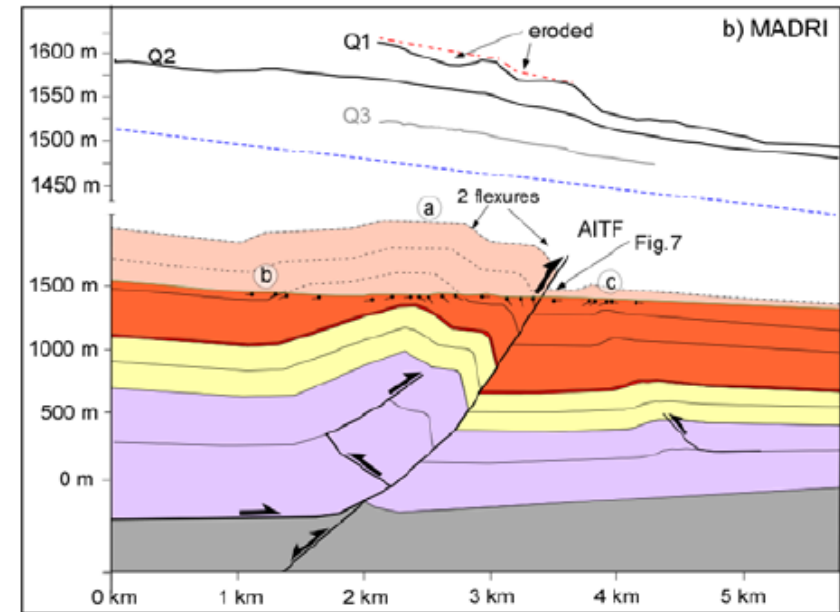
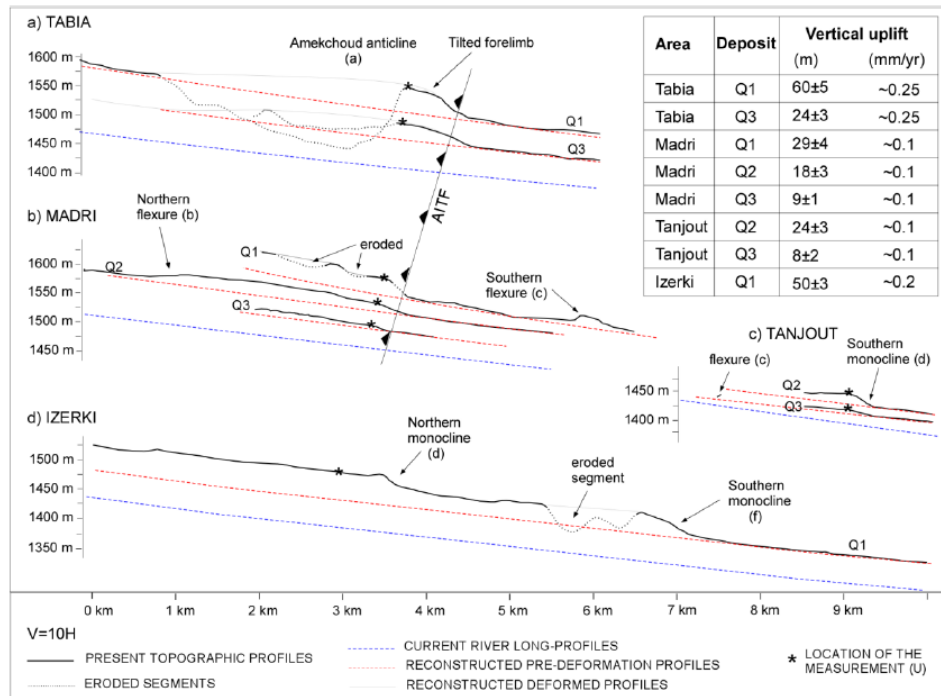
Q4: 7-11 ky (Holocene)

**Fuerte control climático
de la erosión durante el
Cuaternario**

(Velocidad de incisión fluvial 0.5-1.2 mm/ma)



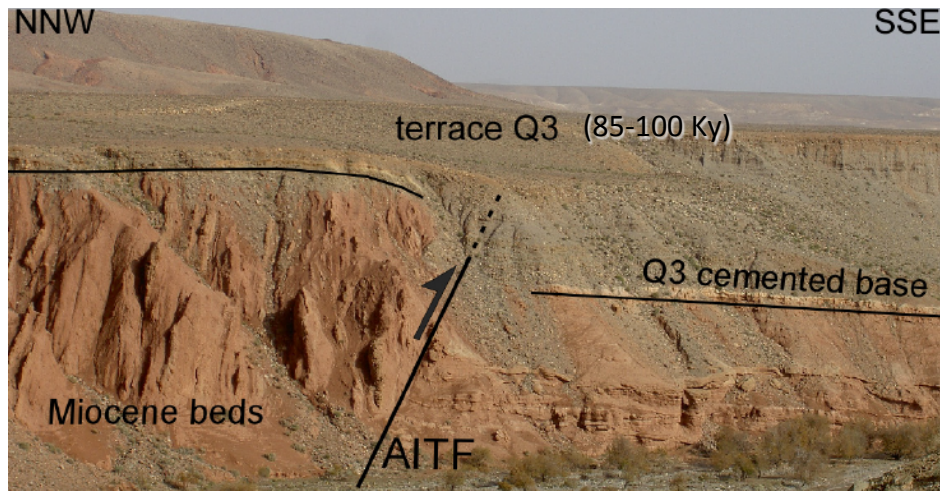
DEFORMACIÓN DE TERRAZAS FLUVIALES



• Velocidad de deformación del anticlinal de Amekchoud desde el Mioceno a la actualidad (250 Ma): 0.1 mm/a

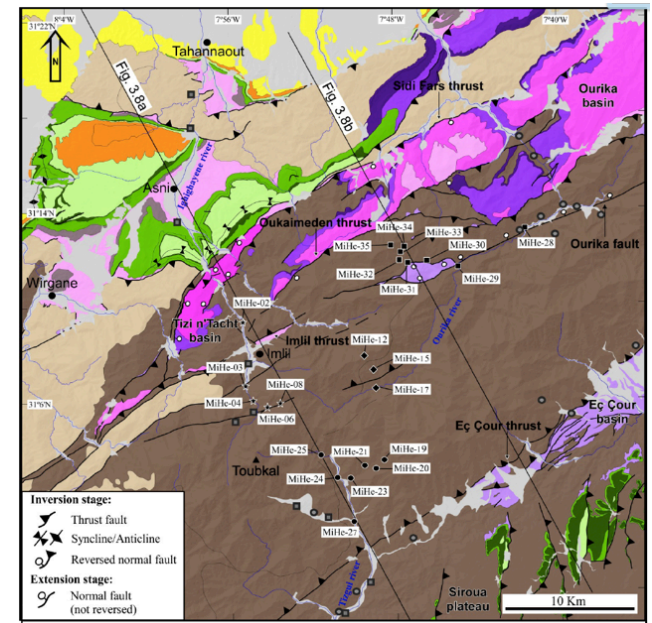
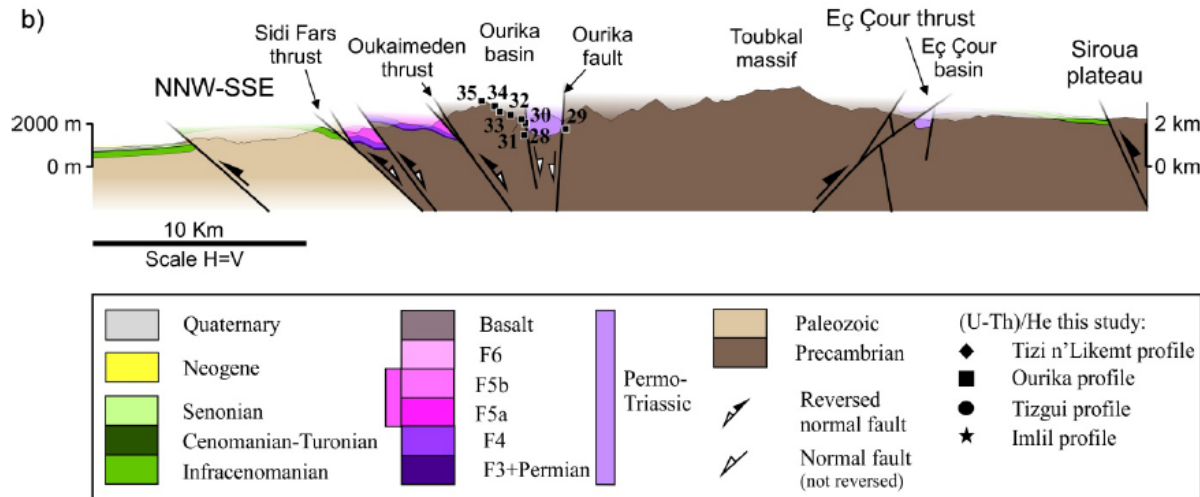
• Velocidades en el Cuaternario sup.: 0.03 to 0.09 mm/yr

Pastor et al (2012)

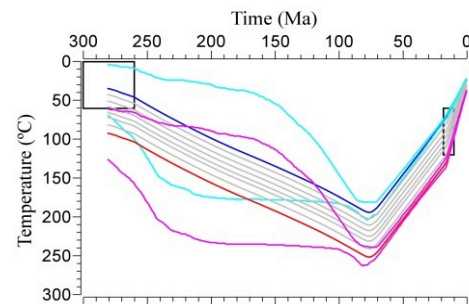


Evolución del relieve del Alto Atlas de Marrakech: Resultados de la termología de (U-Th)He

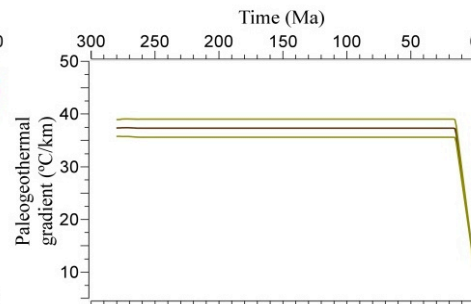
^{238}U , ^{235}U y ^{232}Th \longrightarrow ^4He Apatito \longrightarrow 55-80°C
Circón \longrightarrow 160-200°C



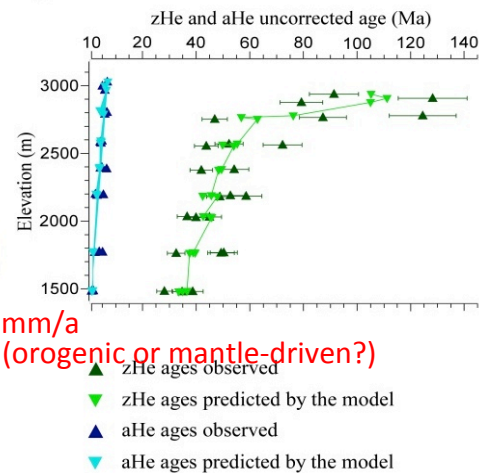
d) Expected thermal model



e) Inferred paleogeothermal gradient



f) Predicted and observed aHe and zHe ages vs. elevation



Late Cretaceous to Early-Late Miocene exhumation = 0.04-0.06 mm/a
Early-Late Miocene to Present-day exhumation = 0.1-0.2 mm/a (orogenic or mantle-driven?)

— Thermal path of the hottest (lower elevation) sample
— 95% credible interval range
— Thermal path of the coolest (highest elevation) sample
— 95% credible interval range
— Thermal path of the intermediate samples

— Inferred paleogeothermal gradient (assuming vertical offset between samples constant over time)
— 95% credible interval range

La orogenia Atlásica en las zonas internas de la cordillera empezó en el Cretácico superior

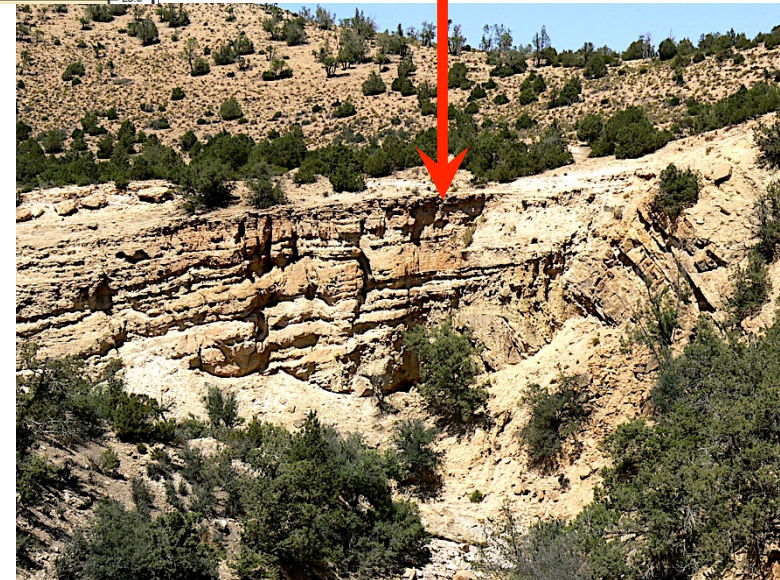
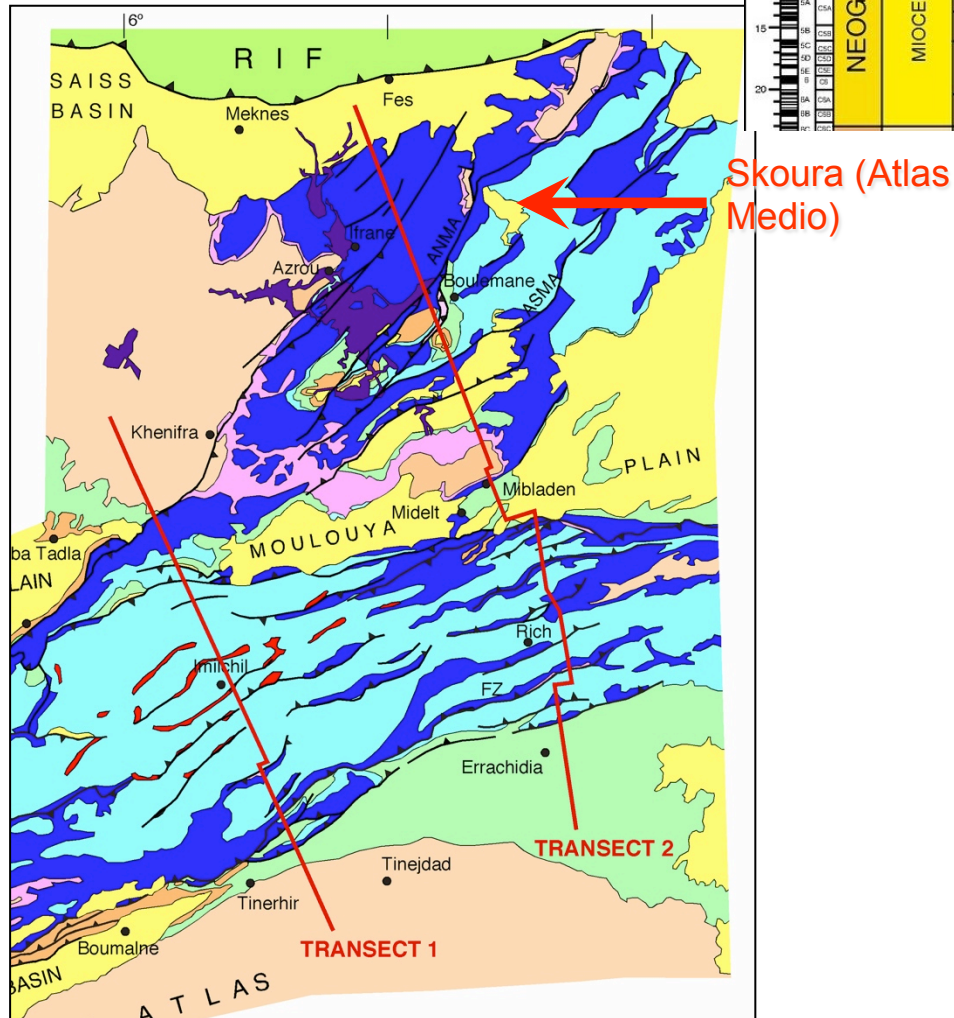
Domenech (2015)

EL LEVANTAMIENTO LA SUPERFICIE (surface uplift) : MARCADORES DE PALEOELEVACIÓN (II)

Sedimentos marinos de edad
Messiniense (5 Ma) situados a
1200 m de altitud

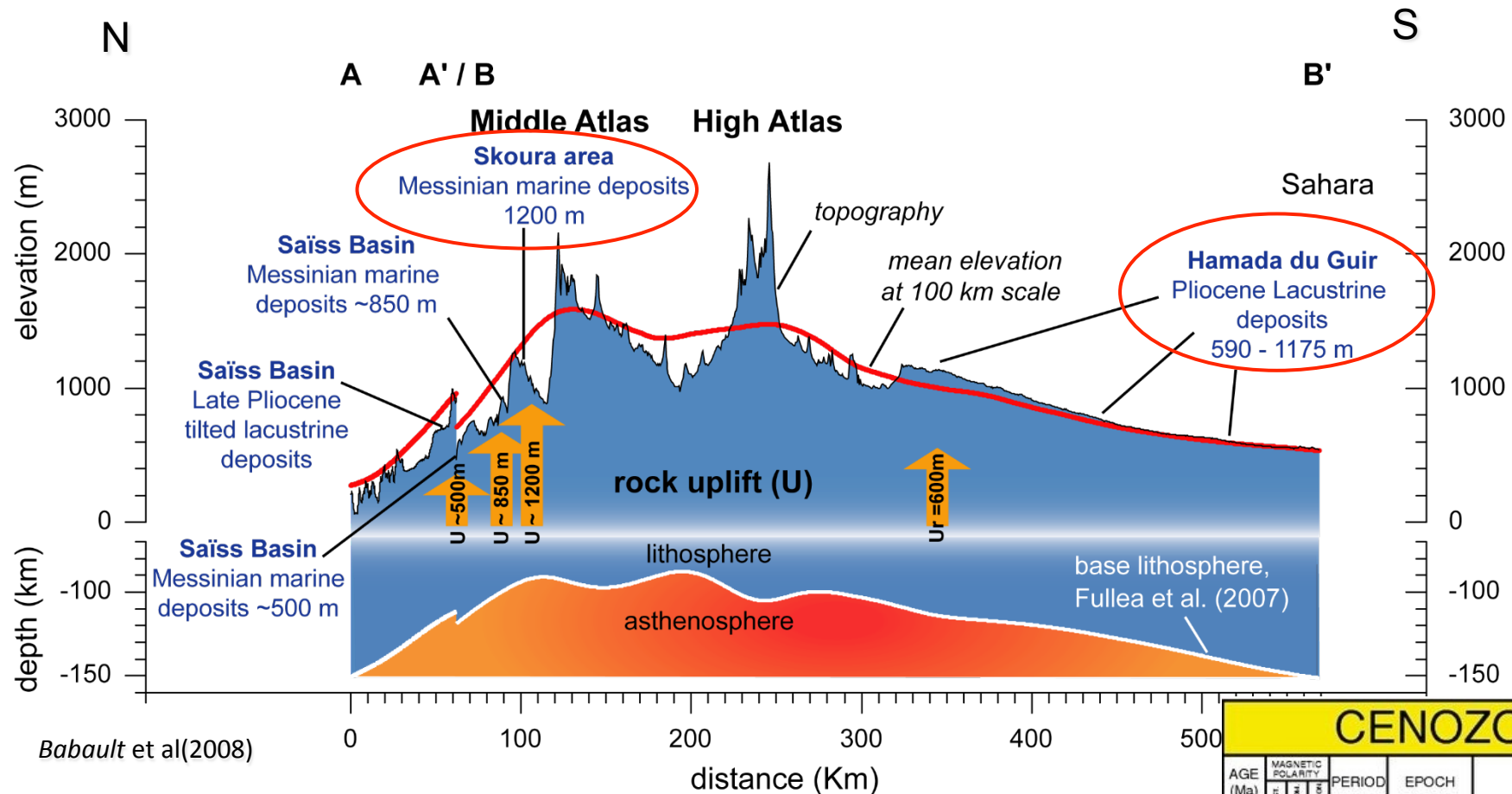
CENOZOIC					
AGE (Ma)	MAGNETIC POLARITY	PERIOD	EPOCH	AGE (Ma)	PICKS (Ma)
0.01		QUATERNARY	HOLOCENE	0.01	
0.02			PLEISTOCENE	0.02	
0.03				0.03	
0.04				0.04	
0.05				0.05	
0.06				0.06	
0.07				0.07	
0.08				0.08	
0.09				0.09	
0.10				0.10	
0.11				0.11	
0.12				0.12	
0.13				0.13	
0.14				0.14	
0.15				0.15	
0.16				0.16	
0.17				0.17	
0.18				0.18	
0.19				0.19	
0.20				0.20	
0.21				0.21	
0.22				0.22	
0.23				0.23	
0.24				0.24	
0.25				0.25	
0.26				0.26	
0.27				0.27	
0.28				0.28	
0.29				0.29	
0.30				0.30	
0.31				0.31	
0.32				0.32	
0.33				0.33	
0.34				0.34	
0.35				0.35	
0.36				0.36	
0.37				0.37	
0.38				0.38	
0.39				0.39	
0.40				0.40	
0.41				0.41	
0.42				0.42	
0.43				0.43	
0.44				0.44	
0.45				0.45	
0.46				0.46	
0.47				0.47	
0.48				0.48	
0.49				0.49	
0.50				0.50	
0.51				0.51	
0.52				0.52	
0.53				0.53	
0.54				0.54	
0.55				0.55	
0.56				0.56	
0.57				0.57	
0.58				0.58	
0.59				0.59	
0.60				0.60	
0.61				0.61	
0.62				0.62	
0.63				0.63	
0.64				0.64	
0.65				0.65	
0.66				0.66	
0.67				0.67	
0.68				0.68	
0.69				0.69	
0.70				0.70	
0.71				0.71	
0.72				0.72	
0.73				0.73	
0.74				0.74	
0.75				0.75	
0.76				0.76	
0.77				0.77	
0.78				0.78	
0.79				0.79	
0.80				0.80	
0.81				0.81	
0.82				0.82	
0.83				0.83	
0.84				0.84	
0.85				0.85	
0.86				0.86	
0.87				0.87	
0.88				0.88	
0.89				0.89	
0.90				0.90	
0.91				0.91	
0.92				0.92	
0.93				0.93	
0.94				0.94	
0.95				0.95	
0.96				0.96	
0.97				0.97	
0.98				0.98	
0.99				0.99	
1.00				1.00	

- 200 m de sedimentos marinos (areniscas, calizas y corales)



Han sido levantados 1000-1200 m desde que se depositaron en un mar poco profundo hace unos 5 millones de años

LEVANTAMIENTO DE GRAN LONGITUD DE ONDA RELACIONADO CON EL MANTO



Edad: Cenozoico sup. (Plioceno a Cuaternario)

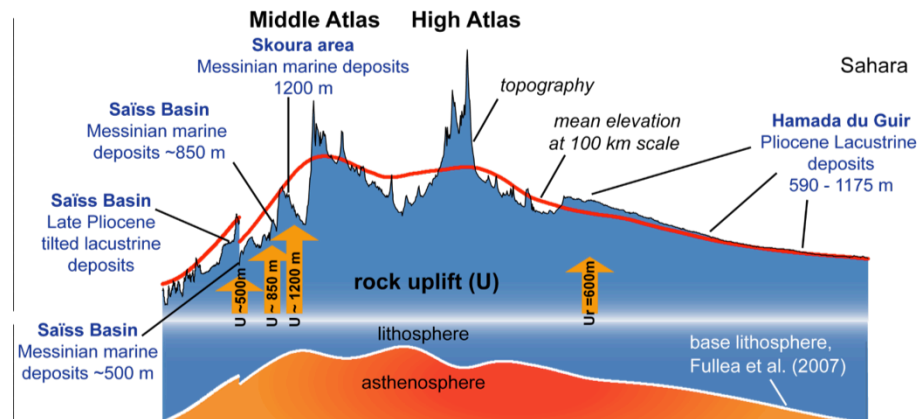
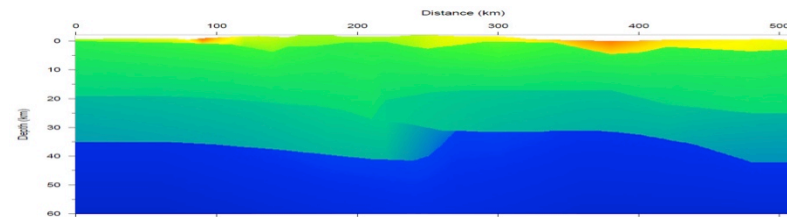
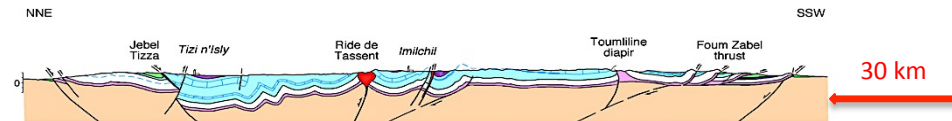
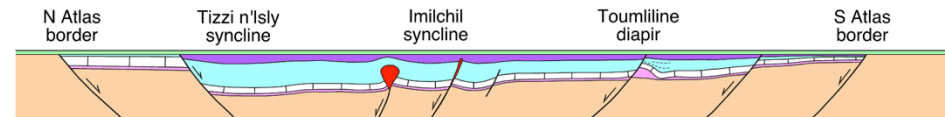
Velocidad media de levantamiento: ~ 0,2 mm/a

Pendiente regional reciente: ~1°

CENOZOIC						
AGE (Ma)	MAGNETIC POLARITY	PERIOD	EPOCH	AGE	PICKS (Ma)	
0.01	1	QUATERNARY	HOLOCENE	CALABRIAN	0.01	
1.8	2			GELASIAN	1.8	
2.6	2A		PLEISTOCENE*	PIACENZIAN	2.6	
3.6	3			ZANCLEAN	3.6	
5.3	3A	NEOGENE	PLIOCENE	MESSINIAN	5.3	
7.2	4				7.2	
11.6	5			TORTONIAN	11.6	
13.8	5A			SERRAVALLIAN	13.8	
16.0	5B			LANGHIAN	16.0	
20.4	5C			BURDIGALIAN	20.4	
23.0	5D			AQUITANIAN	23.0	
	5E					
	5F					
	5G					
	5H					

CONCLUSIÓN

- Extensión durante Triásico- Jurásico y tectónica salina (periodo de rift)
- Deformación compresiva en los últimos 40 Ma y engrosamiento de la corteza (periodo de inversión tectónica).
- La sísmica de refracción ha detectado una raíz cortical que no explica la elevada topografía de las montañas, en parte debida al levantamiento de la astenosfera,
- Existe una litosfera adelgazada (ascenso de la astenosfera) evidenciada por un levantamiento de la superficie de gran longitud de onda en los últimos 5 Ma.



INVESTIGADORES DE LOS PROYECTOS DEL ATLAS

- ANTONIO TEIXELL UAB
- MANUEL JULIVERT UAB
- MOHAMMED CHARROUD U. FES
- PUY AYARZA USAL
- FERNANDO ALVAREZ LOBATO USAL
- JULIEN BABAULT UAB
- ELISEO TESÓN UAB
- LEWIS A. OWEN U. CINCINNATI
- MIREIA DOMÈNECH UAB
- JOAN GUIMERÀ UB
- RAMÓN CARBONELL ITJA CSIC

BIBLIOGRAFÍA

- Arboleya, M.L., Teixell, A., Charroud, M., Julivert, M., 2004. A structural transect through the high and middle Atlas of Morocco. *J. Afr. Earth Sci.* 39, 319e327.
- Arboleya, M.L., J. Babault, L.A. Owen, A. Teixell and R.C. Finkel (2008). Timing and nature of Quaternary fluvial incision in the Ouarzazate foreland basin, Morocco, *J. Geol. Soc.*, 165, 1059-1073.
- Ayarza, P., Alvarez-Lobato, F., Teixell, A., Arboleya, M.L., Teson, E., Julivert, M., Charroud, M., 2005. Crustal structure under the central High Atlas mountains (Morocco) from geological and gravity data. *Tectonophysics* 400, 67e84.
- Ayarza, P., Carbonell, R., Teixell, A., Palomeras, I., Marti, D., Kchikach, A., Harnafi, M., Levander, A., Gallart, J., Arboleya, M.L., Alcalde, J., Fernandez, M., Charroud, M., Amrhar, M., 2014. Crustal thickness and velocity structure across the Moroccan Atlas from long offset wide-angle reflection seismic data: the SIMA experiment. *Geochemistry, Geophysics. Geosystems* 15, 1698e1717.
- Babault, J., Teixell, A., Arboleya, M.L., Charroud, M., 2008. A Late Cenozoic age for long-wavelength surface uplift of the Atlas Mountains of Morocco. *Terra Nova*. 20, 102e107.
- Babault, B., Van den Driessche, J., Teixell, A. (2012). Tectonics from topography: two examples from the Pyrenees and the High Atlas. *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 29 : 94-100 (2009)
- Babault, B., Van den Driessche, J., Teixell, A. (2012). Longitudinal to transverse drainage network evolution in the High Atlas (Morocco): The role of tectonics. *Tectonics*, (AGU), 2012 31, pp.TC4020. <10.1029/2011TC003015>. <insu-00735591>
- Domenech, M., Teixell, A., M.L. Arboleya and Babault, J. (2012) Apertura e inversión de las cuencas triásicas de Tizi n'Test y Tirknit (Alto Atlas Occidental, Marruecos). *Geotemas*.
- Domenech, M., Teixell, A., Babault, J. and M.L. Arboleya (2015). The inverted Triassic rift of the Marrakech High Atlas: A reappraisal of basin geometries and faulting histories. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2015.03.017.
- Domènech, M., A. Teixell, and D. F. Stockli (2016), Magnitude of rift-related burial and orogenic contraction in the Marrakech High Atlas revealed by zircon (U-Th)/He thermochronology and thermal modeling, *Tectonics*, 35, 2609–2635, doi:10.1002/2016TC004283.
- Fossen, H. 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press. Edimburg. 463 pp.
- Marshak, S. (2016) *Essentials of Geology*. W.W. Norton & Co.
- Missenard, Y., H. Zeyen, D. Frizon de Lamotte, P. Leturmy, C. Petit, M. Sébrier and O. Saddiqi (2006). Crustal versus asthenospheric origin of relief of the Atlas Mountains of Morocco, *J. Geophys. Res.*, 111, B03401; doi:10.1029/2005 JB003708.
- Pastor, A., Teixell, A., Arboleya, M.L., 2012. Rates of Quaternary deformation in the Ouarzazate Basin (Southern Atlas Front, Morocco). *Ann. Geophys.* 55, 1003–1016.
- Pastor, A., Babault, J., Owen, L.A., Teixell, A., Arboleya, M.L. (2015). Extracting dynamic topography from river profiles and cosmogenic nuclide geochronology in the Middle Atlas and the High Plateaus of Morocco. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2015.06.007.
- Saura, E., Verges, J., Martin-Martin, J.D., Messenger, G., Moragas, M., Razin, P., Grelaud, C., Joussiaume, R., Malaval, M., Homke, S., Hunt, D.W., 2014. Syn- topost-rift diapirism and minibasins of the Central High Atlas (Morocco): the changing face of a mountain belt. *J. Geol. Soc.* 171, 97e105.
- Teixell, A., M.L. Arboleya, M. Julivert and M. Charroud (2003). Tectonic shortening and topography in the central High Atlas (Morocco), *Tectonics*, 22, 1051; doi: 10.1029/2002TC001460.
- Teixell, A., P. Ayarza, H. Zeyen, M. Fernández and M.L. Arboleya (2005). Effects of mantle upwelling in a compressional setting: the Atlas Mountains of Morocco, *Terra Nova*, 17, 456-461.
- Teixell, A., Ayarza, P., Tesón, E., Alvarez-Lobato, F., Charroud, M., Julivert, M., Barbero, L., Amrhar, M., Arboleya, M.L. (2007). Geodinámica de las cordilleras del Alto y Medio Atlas: síntesis de los conocimientos actuales. *Rev. de la Soc. Geológica de España*, 20, 333-350.
- Teixell, A., Barnolas, A., Rosales, I., Arboleya, M.L. (2017). Structural and facies architecture of a diapir-related carbonate minibasin (lower and middle Jurassic, High Atlas, Morocco). *Marine and Petroleum Geology* 2017 DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2017.01.003
- Tesón, E., and A. Teixell (2008). Sequence of thrusting and syntectonic sedimentation in the eastern Sub-Atlas thrust belt (Dadès and Mgoun valleys, Morocco), *Intl. J. Earth Sci.*, 97, 103-113.
- Tesón, E. (2009). Estructura y cronología de la deformación en el borde Sur del Alto Atlas de Marruecos a partir del registro tectono-sedimentario de la cuenca de antepaís de Ouarzazate, Tesis Doctoral, Univ. Autònoma de Barcelona, Spain, 1-221.
- Tesón, E., E.L. Pueyo, A. Teixell, A. Barnolas, J. Agustí and M. Furió (2010). Magnetostratigraphy of the Ouarzazate Basin: Implications for the timing of deformation and mountain building in the High Atlas Mountains of Morocco, *Geodinamica Acta*, 23, 151-165.



!! GRACIAS !!